

Üçlü diyagram yöntemi ile dalga karakteristiklerinin tahmini

Mehmet ÖZGER^{*}, Zekai ŞEN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Dalga enerjisinin tahmini için belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının bilinmesi gereklidir. Bu iki değişken aslında feç uzunluğu, rüzgâr esme süresi ve rüzgâr hızına bağlı olarak değerler almaktadır. Belirli bir feç mesafesi boyunca ve belirli bir süre zarfında sabit bir hızda esen rüzgarın ortaya çıkardığı dalga yüksekliği ve periyodunu tahmin etmek için bir çok yaklaşım geliştirilmiştir. Burada ilk defa üçlü diyagram modeli yardımıyla rüzgâr hızı, feç mesafesi ve esme süresi gibi büyüklüklerden dalga yüksekliği ve periyodu tahmin edilmeye çalışılacaktır. Üçlü diyagram yönteminin esası jeoistatistiksel ilkelere dayanmaktadır. Jeoistatistikte yatay ve düşey eksenler konumu belirtirken bunları dik kesen üçüncü eksen ise bölgesel değişkeni göstermektedir. Benzer olarak bu çalışmada yatay ve düşey eksenler modele ait girdi değişkenlerini temsil ederken, bunlara dik olan eksende ise elde edilmek istenen çıktı değişkeni yer almaktadır. Daha sonra bu tahminler kullanılarak dalga enerji miktarları elde edilecektir. Bu yöntem girdi ve çıktı değişkenleri arasında doğrusal olmayan ilişkiler kurabilirken tahmin sonuçlarını oldukça geliştirebilmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürde mevcut bulunan JONSWAP formülleri ile karşılaştırılmıştır. Yöntemin uygulanması için Ontario gölünde ölçülmüş saatlik rüzgâr ve dalga verileri düzenlenerek kullanılmıştır. Veriler eğitim ve test verisi olarak iki kısma ayrılmıştır. Önerilen yöntemin dalga karakteristiklerini tahmin etmekte klasik formüle göre çok daha iyi olduğu çeşitli grafik ve nümerik gösterim şekilleri ile ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Dalga enerjisi, belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu, Kriging, jeoistatistik, optimum enterpolasyon, tahmin.*

^{*}Yazışmaların yapılacağı yazar: Mehmet ÖZGER. ozgerme@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 68 47.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Dalga enerjisi tahmini ve stokastik modelleme" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 02.03.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 16.04.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.02.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Ocean wave characteristics prediction by using triple diagram method

Extended abstract

A geostatistical approach was used to express correlation structure between dependent and independent variables of waves and to model prediction uncertainties. This correlation structure is represented by the variography of predicted values in which the distance variable in the variogram is determined by measuring the distance between predictors. This variogram produced from the predictors makes it possible to predict variables as unmeasured points while considering the historic information as measurement points of the field. In fact the method is based on Kriging principles. In order to make optimum interpolation these principles are required. The most important feature is to be applicable for unstationary data. It can relate input variables to output variables in a nonlinear manner. In this study, the method was employed to predict significant wave height and wave period for fetch limited and duration limited cases.

Scatter diagram of variables was plotted prior to application of triple diagram method. These diagrams were called as templates where it can be seen that variables are independent from each other. The variation of third variable considered as output variable was investigated in this scatter area. The variogram based on variation of predictors is characterized the features of scatter area. The semi-variograms (SV) were obtained for each case and output variable. The best theoretical SV which fit to experimental SV were searched. The Gaussian type SV was found to be more appropriate for fetch limited case. The variogram value which does not change with distance anymore is called as sill value. This means that variance is fixed after range value that corresponds to sill. It can be seen that nugget effect is zero which means there are no variations for little distances. If there is rapid variation in the SV values while the distances increase very slowly, then it can be concluded that the variation is very high for closer points. The Gaussian type SV was fitted for the duration limited case. It was shown that sill and range values also exist for the duration limited case. This indicates that concerned event is stationary and has constant variance which also means that it has significant covariance. There is a consistency and continuity in data since nugget

value is close to zero. The slow variation in the SV values while distances increase shows that points show similar properties with each other.

After obtaining the theoretical SV, now one can make optimum interpolation by using Kriging principles. In order to make predictions significant wave height and wave period contour maps were prepared. For fetch limited case while the horizontal axis and vertical axis represent the fetch length and wind speed, the third dimension that perpendicular to those two axis exhibits the wave parameters such as wave height and period. Likewise for duration limited case, blowing duration and wind speed put into horizontal and vertical axes, respectively, as a third axis wave parameters are taken. Triple diagram method outperforms the classical JONSWAP method for both fetch limited and duration limited cases. It is possible to arrive some useful interpretations by using contour maps. The application of this methodology was achieved by using measurements from Ontario Lake. The data obtained from lake was divided into two parts, namely training and testing. Training data were used to set up the model and testing data were employed for validation.

Moreover in order to develop the prediction results, adaptive triple diagram method was proposed. This developed method makes it possible to predict errors which come from the triple diagram method and to add the predicted errors to the previous step results. This procedure can be repeated many times until reaching to correct results. However, here satisfactory results were obtained after one step. It is apparent that results were improved much more comparing the triple diagram method.

After predicting the wave parameters correctly, these parameters were used to obtain wave power values. Wave power contour maps were constructed using wind properties. It is possible to predict wave power from fetch length, blowing duration and wind speed by employing these maps. It is also concluded that wind speed has a significant effect on the wave power comparing to fetch length and blowing duration. For the small values of fetch length and blowing duration, these parameters loose their effects on wave power.

Keywords: Wave energy, significant wave height, average wave period, Kriging, geostatistics, optimum interpolation, prediction.

Giriş

Dalga yüksekliği, H_s ve sıfırdan yukarı geçişli ortalama periyot, T_z , dalgakıran tasarımlarında, dalga enerjisi üretiminde, kıyı emniyeti çalışmalarında, marinalarda ve diğer kıyı mühendisliği uygulamalarında sıkça kullanılan dalga parametreleridir. Literatürde bu parametrelerin tahmini için birçok yöntem geliştirilmiştir ama bunlar çoğu zaman doğru sonuca ulaşmaktan geri kalmışlardır (Mandal vd., 2005).

Pratikte sayısal dalga modellerinin yerine basit dalga tahmin yöntemlerinin kullanılması tercih edilir. Bu konu üzerinde birçok araştırmacı farklı yöntemler öne sürmüştür. Darbyshire (1963) ve Bretschneider (1973) belli bir fec uzunluğu ve sürede sabit hızda esen rüzgârın meydana getirdiği dalga yükseklikleri için bir dalga tahmin modeli sunmuştur. Pierson ve Moskowitz (1964) (PM) tam gelişmiş deniz durumu için dalga enerjisi spektrumu ile adını duyurmuştur. Hasselmann ve diğ. (1973) PM spektrumunu Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) sonuçlarını kullanarak daha da geliştirmiştir. Carter (1982) modeller arasında en uygununu belirlemek için Bretschneider (1973) ve Darbyshire (1963) formülleri ile JONSWAP sonuçlarını karşılaştırmıştır. JONSWAP sonuçlarının daha iyi tahminler verdiğini öne sürmüştür. Ayrıca Bishop (1983) Donelan yönteminin (Donelan, 1980; Donelan, vd., 1985) JONSWAP ve Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB) yöntemlerine (Bretschneider, 1970) göre çok az bir farkla daha iyi bir davranış sergilediği sonucuna varmıştır.

Son yıllarda modern modelleme tekniklerinin hızla yayılması ile beraber, dalga tahmin modelleri de sıkça kullanılır hale gelmektedir. Yapay sinir ağları (YSA) ile dalga parametreleri tahmin edilebilmektedir (Deo ve Kiran Kumar, 2000; Deo vd., 2001; Tsai vd., 2002; Deo ve Jagdale, 2003; Makarynsky 2004 ve Makarynsky vd., 2005). Kazeminezhad ve diğerleri (2005) fec sınırlı durum için rüzgar hızı ve fec uzunluğundan dalga parametrelerini bulanık model ile elde etme yoluna gitmiştir. Diğer taraftan, dalga tahminleri için alışlagelmiş zaman serisi modelleri de kullanılmıştır. Bunun

için stokastik modeller olarak oto regresif kayan ortalama (ARMA ve ARIMA) süreçleri uygulanmıştır (Agrawal ve Deo, 2002).

Bu çalışmada dalga tahminleri için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Yöntemin esası varyogram analizine ve Kriging tahminlerine dayanmaktadır. ASCE (1990a) jeostatistik süreçlerin temel özellikleri ve Kriging tekniği ile tahminlerin nasıl yapılacağı üzerinde durmuştur. Ayrıca jeostatistiksel yöntemlerin su biliminde kullanımı hakkında bazı uygulamalar gösterilmiştir (ASCE, 1990b). İki değişkenin birbirine göre değişimi kartezyen koordinat sisteminde rahatlıkla görülebilirken, değişken sayısı üçe çıktığı zaman bunların ortak davranışını ancak kontur haritaları vasıtasıyla görebiliriz (Sırdaş ve Şen, 2003). Ayrıca kontur haritaları tahmin amaçlı en iyi (optimum) enterpolasyon yapmak için de kullanılır (Şen vd., 2004, Araghinejad vd., 2006). Klasik jeostatistik uygulamalarında x-y eksenleri koordinat takımını gösterirken, önerilen yöntemde bu eksenler yerine problemde kullanılan değişkenler yerleştirilmiştir. Bu yöntem esas alınarak belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu gibi dalga parametrelerini fec sınırlı ve süre sınırlı durumlar için tahmin etmek mümkündür. Fec sınırlı durum için girdi değişkenleri fec uzunluğu ve rüzgâr hızı alınırken, süre sınırlı durum için değişkenler esme süresi ve rüzgâr hızı olarak alınmaktadır. Sunulan yöntemin sonuçları klasik JONSWAP sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

JONSWAP yöntemi

JONSWAP spektrumu gelişen deniz durumu için dalga karakteristiklerini tahmin etmekte sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemde beklenen spektrum, $E(f)$, frekans, f , şu şekilde ifade edilir, (Hasselmann vd., 1973).

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-4} \right] \cdot 3.3 \exp \left[-(f - f_m)^2 / 2\sigma^2 f_m^2 \right]$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f < f_m \\ 0.09 & f \geq f_m \end{cases} \quad (1)$$

burada f_m frekansın spektral tepe değerini göstermektedir. Feç sınırlı durum için tanımlanan belirgin dalga yüksekliği H_s şu şekilde tahmin edilir.

$$H_s = 0.0163X^{1/2}U \quad (2)$$

ve süre sınırlı durum için,

$$H_s = 0.0146D^{5/7}U^{9/7} \quad (3)$$

denklemleri kullanılır. Burada H_s = belirgin dalga yüksekliği (m), X = feç uzunluğu (km), U = rüzgâr hızı (m/s) ve D = süre (saat) olarak belirtilmiştir. Feç sınırlı durum için ortalama dalga periyodu,

$$T_z = 0.439X^{3/10}U^{2/5} \quad (4)$$

ve süre sınırlı ise,

$$T_z = 0.419D^{3/7}U^{4/7} \quad (5)$$

formülleri ile hesaplanır. Eğer aşağıdaki şart sağlanıyorsa, feç sınırlı durum için yazılan formüller geçerlidir.

$$D > 1.167X^{0.7}/U^{0.4} \quad (6)$$

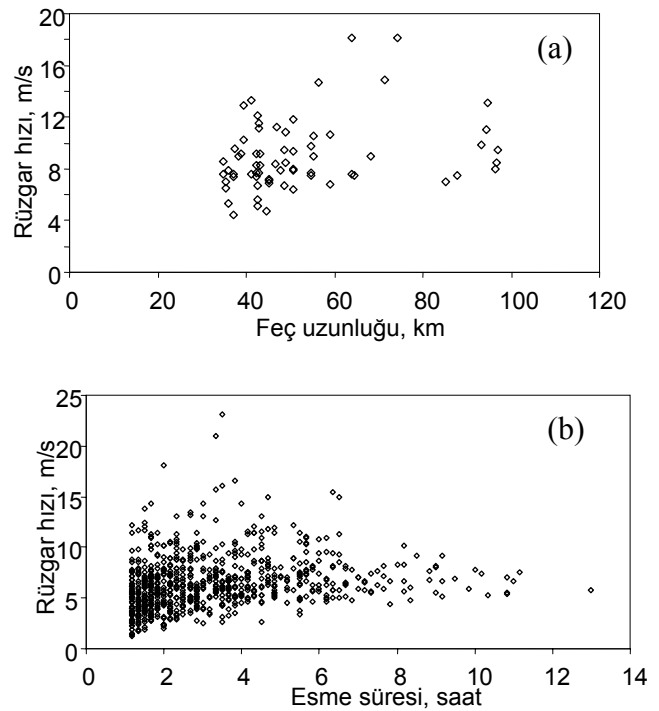
Aksi takdirde süre sınırlı duruma ait olan eşitlikler kullanılır.

Kriging ve Üçlü Diyagram Yöntemi (ÜDY)

Herhangi bir jeoistatistiksel uygulamada amaç x-y koordinatlarında yer alan değişkenleri esas alarak, z eksenini ile temsil edilen doğa olayının davranışını inceleyebilmektir. Çevreye ait birçok özellik ancak belirli konumlarda yer alan sınırlı sayıda istasyonlardan ölçülebilenken, aynı bölgeye ait farklı konumlardaki büyüklükler eldeki mevcut verilerden tahmin edilebilmektedir. Bir olay uzayda yayılmak suretiyle çeşitli değerler alıyor ise bunun bölgeselleşmiş değişken (BD) olarak modellenmesinden söz edilebilir. BD'nin üzerinde değerler aldığı uzay her gün içinde dolaştığımız metrik uzaya (x-y-z koordinatları) ek olarak za-

man, parametre ve özellik uzaylarını da içermektedir. Uzayda ölçülen değerler matematik fonksiyonlar ile ifade edilemeyen düzensiz bir yapı ortaya koymaktadır. BD teorisinin uygulanmasında, yapısal formları ortaya çıkaran teorik bir zemin hazırlanması (varyogram ve kovaryans) ve tahmin problemini çözecek modelin (mesela Kriging gibi) kurulması gibi iki ana aşama vardır. Jeostatistik, ölçüm yapılmayan bir yerel noktada incelenen büyüklüğün değerini tahmin etmeye imkan tanıyan yöntemlerin birleşimidir. Jeostatistikte kullanılan en önemli araçlardan birisi stokastik bölgesel değişime dayanan tahmin problemine çözüm getiren Kriging'tir (Kriege, 1951, Matheron, 1963). Bu yöntem var olan bilgiyi en iyi şekilde kullanılabilmek için bölgesel değişimini ifade eden varyogramlardan (veya yarı varyogram) faydalananır. Buna göre ölçüm yapılamayan bir konumun değerini tahmin etmek için komşu konumlarda bulunan verilerin mesafe ile değişen ağırlıklı ortalaması alınır.

Burada rasgele değişim bölgesi sanal eksenler olarak adlandırılan iki girdi değişkeninin saçılma diyagramı bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Girdi değişkenleri saçılma diyagramları
(a) Feç uzunluğu ve rüzgâr hızı, (b) Rüzgâr esme süresi ve rüzgâr hızı

Rasgele değişken, girdi değişkenlerine bağlı olarak davranışı incelenmek istenen çıktı değişkenidir. Dolayısıyla sanal eksenlerden biri rüzgâr hızı diğeri de feç uzunluğu veya rüzgâr esme süresi olmak üzere sanal bölgedeki rasgele değişken belirgin dalga yüksekliği veya ortalama dalga periyodu olarak tanımlanmıştır. Böylece tahmin edilmek istenen noktanın değeri ona en yakın noktaların ağırlıklı ortalaması şeklinde belirlenecektir. Tahmin modeli, Z belirgin dalga yüksekliği veya ortalama dalga periyodu, U rüzgâr hızı, Y feç uzunluğu veya rüzgâr esme süresi olmak üzere aşağıdaki kapalı ilişkiyi açmak içindir. Modelin genel gösterimi

$$Z_i = f(U_i, Y_i) + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

şeklinde. Burada n ölçüm noktaları sayısı ve ε ise yapılan haritalamanın hatasıdır. Bir bölgede birbirine yakın x ve $x+h$ konumlarında bulunan rasgele değişkenin h mesafeyi göstermek üzere aldığı değerler $Z(x)$ ve $Z(x+h)$ ise h mesafe vektörü aslında iki girdi değişkeni arasındaki geometrik uzaklığı belirtmektedir. İki girdi değişkeni ile birlikte Kriging kullanılarak eş dalga karakteristikleri haritaları çizilebilir. $Z(x)$ 'in varyansı, ortalama değer olan $m(x)$ 'ten olan sapmaların karelerinin ortalaması olarak tanımlanabilir.

$$Var[Z(x)] = E[Z(x) - m(x)]^2 \quad (7)$$

Burada, E beklenen değer (ortalama) operatörüdür. $Z(x+h)$ 'in varyansı da benzer yoldan ifade edilebilir. Kovaryans ise $Z(x)$ ve $Z(x+h)$ arasındaki değişimi gösterir ve şu şekilde ifade edilir.

$$C(x, x+h) = E\{[Z(x) - m(x)][Z(x+h) - m(x+h)]\} \quad (8)$$

Daha iyi yorumlar yapabilmek için kovaryans ifadesi korelogram $\rho(x, x+h)$ cinsinden ifade edilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\rho(x, x+h) = \frac{C(x, x+h)}{\{Var[Z(x)]Var[Z(x+h)]\}^{1/2}} \quad (9)$$

Korelasyon yapısı yarıvaryogram ile aşağıdaki gibi ifade edilir (Matheron, 1963).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var[Z(x) - Z(x+h)] \quad (10)$$

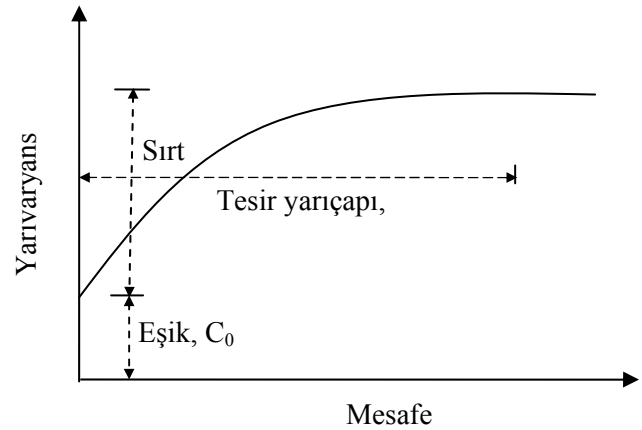
$\gamma(h)$ ve $C(h)$ arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanır.

$$\gamma(h) = \sigma^2 - C(h) \quad (11)$$

Burada σ^2 sabit kabul edilen varyanstır. Jeostatistik tahmin yapmadan önce eldeki verilerden yarı varyogram (YV) elde edilir. Bunun için konumlarına göre eşleştirilen veri değerleri aralarında bulunan mesafeye göre gruplara ayrılır. Deneysel yarı varyogram herbir sınıf aralığı için aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h') - z(x_i)]^2 \quad (12)$$

Burada $z(x_i)$, x_i noktasındaki ölçüm değeri; $z(x_i+h')$, x_i+h' noktasındaki ölçüm değeri; h , mesafeye göre gruplanmış aralıklarda kalan veri noktası ikilileri arasındaki ortalama uzaklığı ve $N(h)$ ise bu aralıklarda kalan toplam veri eşleştirilmesinin sayısıdır. Yarı varyogram (YV) değerleri belirlendikten sonra artık bu dağılıma en iyi uyan teorik YV seçilebilir (Myers vd., 1982). YV öğeleri eşik, sırt ve tesir yarıçapı olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yarıvaryogram parametreleri

YV'lar hem bölgesel değişkenin dağılımını yorumlamada, hem de tahmin probleminin çözümünde kullanılmaktadır. YV modelleri sırtlı (sill) ve sırtsız olmak üzere ikiye ayrılırlar. Sırt YV değerinin sabitlendiği en büyük değerdir ve

yaklaşık olarak bölgesel değişkenin varyansına eşittir. YV'nin sırt değerini alırken yatay eksen- de okunan kritik mesafe de tesir yarıçapı ismini alır. Bu ise ilgilenilen olayın durağan olmadığı ve varyansın sonsuza gittiğini ama diğer yandan kovaryansın olmadığı anlamına gelir. Böyle du- rumlarda sırt ve etki alanı bir anlam ifade etmez. Sırtsız YV modelleri aşağıdaki ifade ile temsil edilirler (Cressie, 1985, 1993).

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + bh, \quad h > 0 \\ \gamma(0) &= 0, \quad h = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Burada C_0 eşik değerini, b ise modelin eğimini göstermektedir. Sırtlı modeller dönüşüm model- leri olarak da isimlendirilirler. Bunlar, küresel, eksponansiyel, Gauss vb. modellerdir (Isaaks ve Srivastava, 1989; Journel ve Huijbregts, 1978; Subyani, 1997; Subyani ve Şen, 1989). Küresel model sırt değerine çok hızlı bir şekilde ulaşır- ken, etki alanından sonra fonksiyon yatay olur. Eksponansiyel ve Gaussien model, küresel mo- dele benzer ama daha yavaş yükselir. Küresel model,

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h \leq a, \quad (14)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C = sill \quad h > a,$$

eksponansiyel model,

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad h > 0 \quad (15)$$

$$\gamma(0) = 0,$$

ve Gauss modeli,

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \quad (16)$$

$$\gamma(0) = 0,$$

matematik ifadeleri ile verilmiştir (Clark, 1979). YV aslında doğa olayının mekânsal ilişkilerini karakterize eden ve yorumlayan bir istatistik araçtır. Kısaca YV'nin elemanları olan sırt de- ğişkenliğin miktarını gösterir, etki alanı ilgile- nilen noktanın etkili olduğu uzaklığı verir ve

eşik etkisi ise küçük mesafelerde hızlı değişim- lerin olduğunu gösterir. Artık bilinmeyen nokta değerlerinin hesaplanabilmesi için jeostatistiksel enterpolasyon uygulanabilir. x_0 konumundaki Z değişkeninin beklenen değeri ölçülen verilerin $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$, ağır- lıklı ortalaması olarak aşağıdaki şekilde tahmin edilir.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (17)$$

Burada $Z^*(x_0)$, x_0 'da Z 'nin tahmin edilen değeri; λ_i 'ler, ağırlıklar ve n , tesir alanının içinde kalan ve tahmin için kullanılan nokta sayısıdır. Bu denklemi incelenen probleme uyarladığımız zaman saçılma diyagramında bulunan herhangi bir nokta için dalga parametreleri tahmini şu şekilde elde edilir.

$$D(x_s) = \sum_{i=1}^n w_i D(x_i) \quad (18)$$

Burada $D(x_s)$ değeri araştırılan x_s noktasındaki dalga parametresi, $D(x_i)$, i noktasında bulunan dalga parametresi ölçümleri ve w_i 'ler de YV fonksiyonu kullanılarak elde edilen ağırlıklardır. Ağırlık katsayıları belirlendikten sonra $D(x_s)$ değerleri tahmin edilebilir. Bu katsayıları elde etmek için aşağıdaki matris çözümüne ihtiyaç vardır (Isaaks and Srivastava 1989, Subyani 1997).

$$\begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ w_n \\ \mu \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma_{v1} \\ \gamma_{v2} \\ \cdot \\ \gamma_{vn} \\ 1 \end{vmatrix} \quad (19)$$

Burada γ_{ij} 'ler i ve j noktaları arasındaki YV de- ğerleri, γ_{vi} tahmin değeri araştırılan ve diğer noktalar arasındaki YV değerleri ve son olarak μ , Lagrange parametresidir. Ağırlık katsayıları matrisi, matris tersi işlemi uygulandıktan sonra aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{v1} \\ \gamma_{v2} \\ \cdot \\ \gamma_{vn} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Böylece teorik YV değeri belirlendikten sonra Kriging yönteminin uygulanması ile dalga parametreleri, rüzgâr hızı ve feç uzunluğu veya rüzgâr esme süresinden tahmin edilebilir.

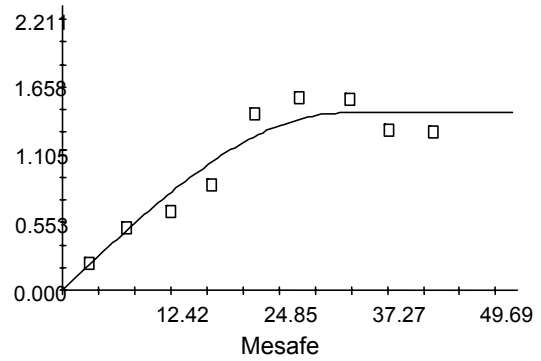
Veri ve uygulama

Yöntemin uygulanması için Ontario Gölü'nde kaydedilen meteorolojik ve dalga verileri kullanılmıştır. Uygulamadan önce 45012 (National Data Buoy Center, <http://www.ndbc.noaa.gov/hmd.shtml>) no'lu istasyonun verileri eğitim ve sınav aşaması olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Eğitim verisi Nisan-Kasım 2002 arası ve Haziran-Kasım 2003 arası olmak üzere alınırken, Nisan-Kasım 2004'te ölçülen veriler sınav verisi olarak kullanılmıştır.

Dalga tahminleri için rüzgâr hızı, feç uzunluğu ve rüzgâr esme süresi gibi çeşitli büyüklüklerin verilerden elde edilmesi gereklidir. Feç uzunluğu açık denizde rüzgârın belirli bir yönde ve sabit bir hızda herhangi bir engelle karşılaşmadan estiği yatay uzunluğa denir. Bu uzunluk boyunca sabit hızlı rüzgârın deniz yüzeyine uyguladığı kayma gerilmesi ile dalga oluşur. Rüzgar hızının bütün feç boyunca sabit bir değerde kalması mümkün olmadığı için, çoğu zaman ortalama rüzgar hızından olan sapmalar 2.5 m/s'yi geçmiyorsa bu rüzgar hızı sabit kabul edilir. Aynı şekilde rüzgâr yönündeki sapmalar da 15°'yi aşmıyorsa rüzgâr yönünün değişmediği kabul edilir. Sabit rüzgâr hızının süresi yukarıdaki şartı sağlayan art arda gelen zamanların toplamına eşittir. Bu zaman zarfında meydana gelen rüzgâr hızları ve yönlerinin ortalaması aradığımız değerlerdir. Diğer taraftan, 0.3 m'den daha düşük belirgin dalga yükseklikleri, önemli dalgalar olarak değerlendirilmedikleri için ihmal edilmişlerdir (Bishop, 1983).

Uygulama kısmında kullanacağımız Kriging yöntemi için ilk önce alansal yapıyı ve korelasyonu temsil eden varyogram fonksiyonunun çıkartılması gereklidir. Verilerden bulunan YV elde edildikten sonra yukarıda bahsedilen teorik fonksiyonlardan bir tanesinin buna uydurulması gereklidir. Buradaki alansal yapı x ve y eksenlerinde bulunan girdi değişkenlerine ait verilerin saçılma diyagramlarının meydana getirdiği sanal bir ortamdır.

Feç sınırlı durum için Şekil 3'ten de görüldüğü gibi mesafe ve YV değerlerine göre saçılma diyagramı çizildiğinde buna uydurulacak en uygun modelin küresel YV modeli olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Feç sınırlı durum için ortalama dalga periyodu üçlü haritalarının hazırlanmasında kullanılan küresel YV'lar

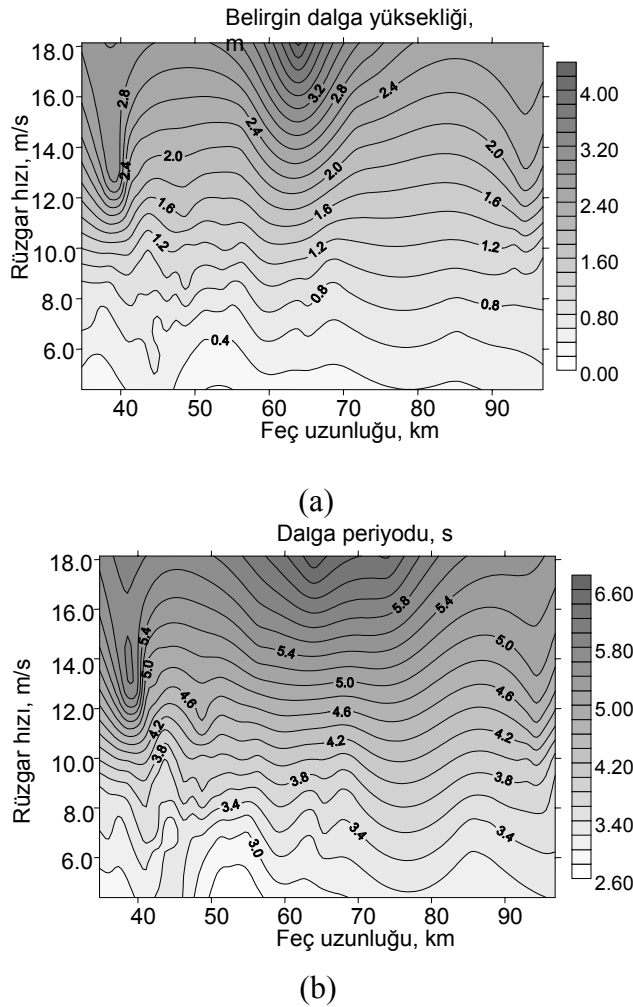
Feç sınırlı ve süre sınırlı durum için elde edilen YV parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Yarıvaryogram parametreleri

	Eşik	Sırt	Aralık
Feç sınırlı durum			
Belirgin dalga yüksekliği	0	0.971	28.71
Ortalama dalga periyodu	0	1.446	32.25
Süre sınırlı durum			
Belirgin dalga yüksekliği	0	1.728	13.49
Ortalama dalga periyodu	0.085	2.583	13.44

Bulgular ve tartışma

YV'lar elde edildikten sonra Kriging yöntemi ile tahmin aşamasına gelinmiştir. Bunun için Kriging yöntemi temel alınarak eş belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyot haritaları çizilir. Üçlü diyagramlar olarak adlandırılan bu haritalarda girdi değişkenleri temel alınmak suretiyle çıktı değişkeni için optimum enterpolasyon yapılması işlemi kolaylaşır. Feç sınırlı ve süre sınırlı durum için hazırlanan kontur haritaları Şekil 4a ve b' de gösterilmiştir.



Şekil 4. Feç sınırlı durum için (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) Sıfır yukarı geçişli dalga periyodu için üçlü diyagram yöntemi tahminleri

Üçlü Diyagram Yöntemi (ÜDY) kullanılarak elde edilen sonuçlar hem feç sınırlı hem de süre sınırlı durumlar için JONSWAP yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin ve JONSWAP modelinin davranışları grafik ve sa-

yısal olarak değerlendirilmiştir. Sayısal değerlendirme yollarından birisi hata karelerinin ortalamasının gözlem varyansına oranının birden çıkarılması ile elde edilen verimlilik katsayısıdır (Nash ve Sutcliffe, 1970). Bu katsayı $-\infty$ ve 1 arasında değerler alırken bire yakın çıkması modelin iyi tahminlerde bulunduğu işaret eder. Buna ek olarak modellerin sınanmasında aşağıda verilen hataların mutlak değerinin ortalaması ölçütü de kullanılmıştır.

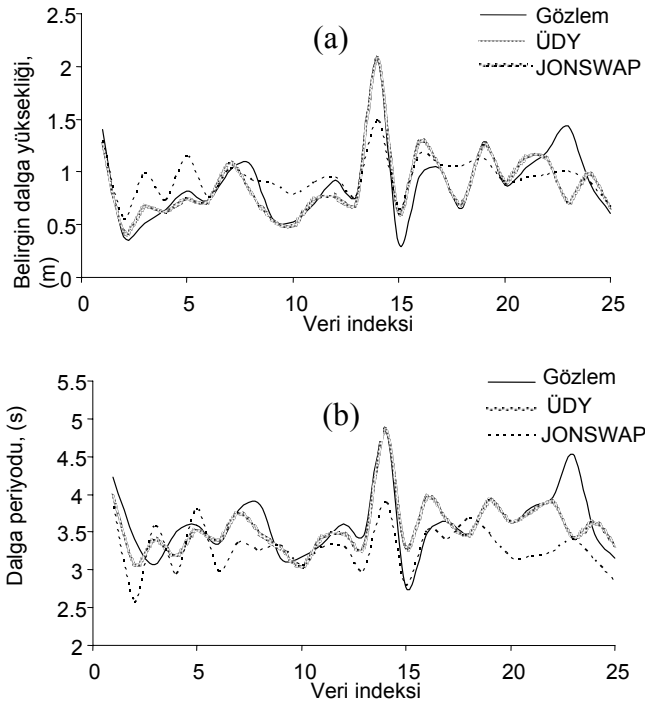
Tablo 2. Hata ölçütlerine göre ÜDY ve JONSWAP sonuçlarının karşılaştırılması

	ÜDY		JONSWAP	
	R2	OMUH (m)	R2	OMUH (m)
Feç sınırlı durum				
Belirgin dalga yüksekliği	0.76	0.11	0.58	0.19
Ortalama dalga periyodu	0.55	0.20	-0.21	0.42
Süre sınırlı durum				
Belirgin dalga yüksekliği	0.43	0.16	-1.37	0.39
Ortalama dalga periyodu	0.07	0.31	-27.11	2.11

$$OMUH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_{ti} - D_{gi}| \quad (21)$$

Burada D_{ti} ve D_{gi} i -inci tahmin edilen ve gözlem yapılan değerler ve N toplam gözlem sayısıdır. Tablo 2'de her iki durum için sonuçlar görülebilir. Bu tablodan da görüleceği üzere ÜDY daha düşük tahmin hataları vererek JONSWAP yöntemine göre daha iyi bir davranış sergilemiştir.

Feç sınırlı durum için ÜDY'nin tahmin değerlerinin gözlem değerlerini oldukça yakından takip ettiği Şekil 5'ten görülmektedir. Şekil 6 ise yine aynı durum için tam model doğrusu etrafındaki saçılımları vermektedir.

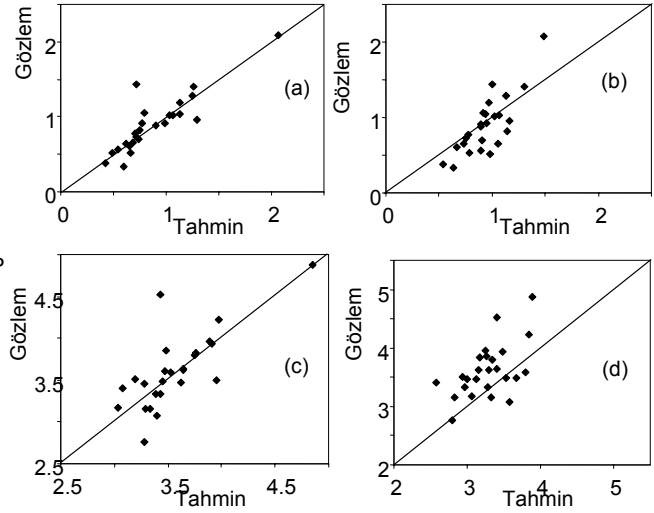


Şekil 5. Model sonuçlarının gözlemler ile karşılaştırılması (a) belirgin dalga yüksekliği (b) dalga periyodu

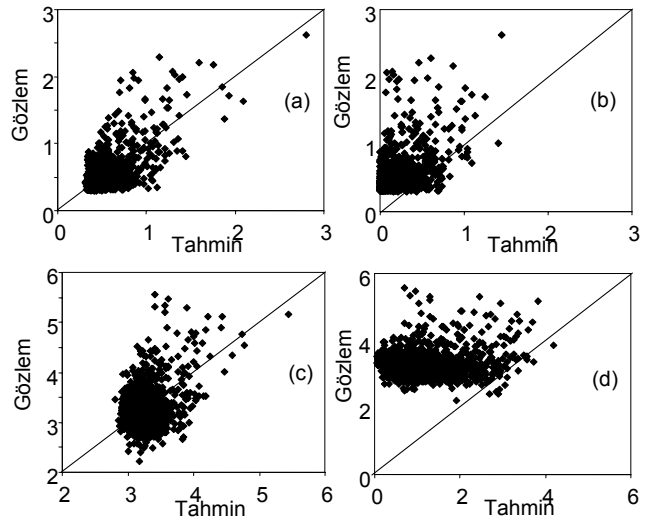
Yinelenebilir (Adaptif) Üçlü Diyagram Yöntemi (YÜDY)

Şekil 7’den görüldüğü gibi ÜDY yöntemi ile yapılan dalga periyodu tahminleri JONSWAP modeline göre daha iyi olmasına rağmen bunun daha da iyileştirilmesi mümkündür. Tahminleri iyileştirmek için Yinelenebilir (Adaptif) Üçlü Diyagram Yöntemi (YÜDY) geliştirilmiştir. Yinelenebilirlik özelliği ilk olarak yapılan tahminlerin hatalarının aynı girdi değişkenleri tarafından bir kez daha tahmin edilmesi ve bunların tahmin sonuçlarına ilave edilmesi ile kazandırılmıştır. Değişkenlere göre hata haritası Şekil 8’de gösterilmiştir. Her iki şekle bakıldığında hata haritasının belirgin dalga yüksekliği haritasına göre daha karmaşık çıkmaktadır. Özellikle esme süresinin düşük olduğu bölümlerde hataların çoğaldığı görülmektedir. Sonuç olarak YÜDY’i uygulandığında model tahminlerindeki doğruluğun arttığı Şekil 9’dan görülmektedir. Aynı şekilde süre sınırlı durum için

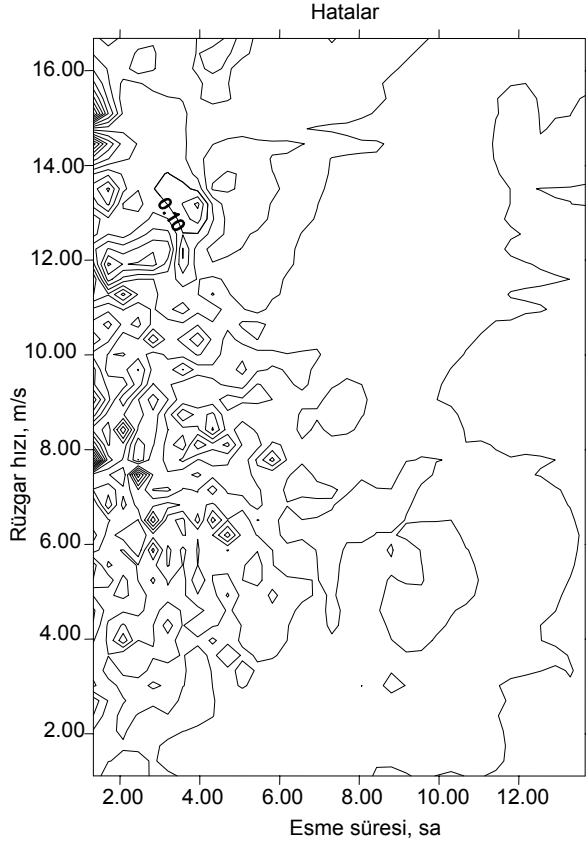
YÜDY ile dalga periyodu tahmin haritaları Şekil 10’da verilmiştir. Model tahminlerinde oldukça yüksek doğruluk sağlanmıştır (Şekil 11).



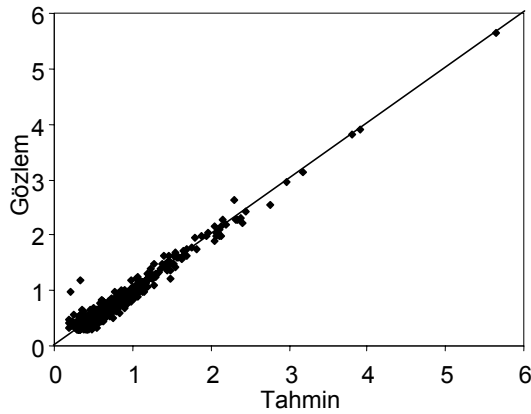
Şekil 6. Feç sınırlı durum için (a) ÜDY, (b) JONSWAP ile belirgin dalga yüksekliği tahminleri, süre sınırlı durum için (c) ÜDY, (d) JONSWAP ile sıfır yukarı geçişli dalga periyodu tahminleri



Şekil 7. Süre sınırlı durum için (a) ÜDY (b) JONSWAP ile belirgin dalga yüksekliği tahminleri, süre sınırlı durum için (c) ÜDY (d) JONSWAP ile sıfır yukarı geçişli dalga periyodu tahminleri



Şekil 8. YÜDY ile süre sınırlı durumda belirgin dalga yüksekliği tahmini için hata haritası

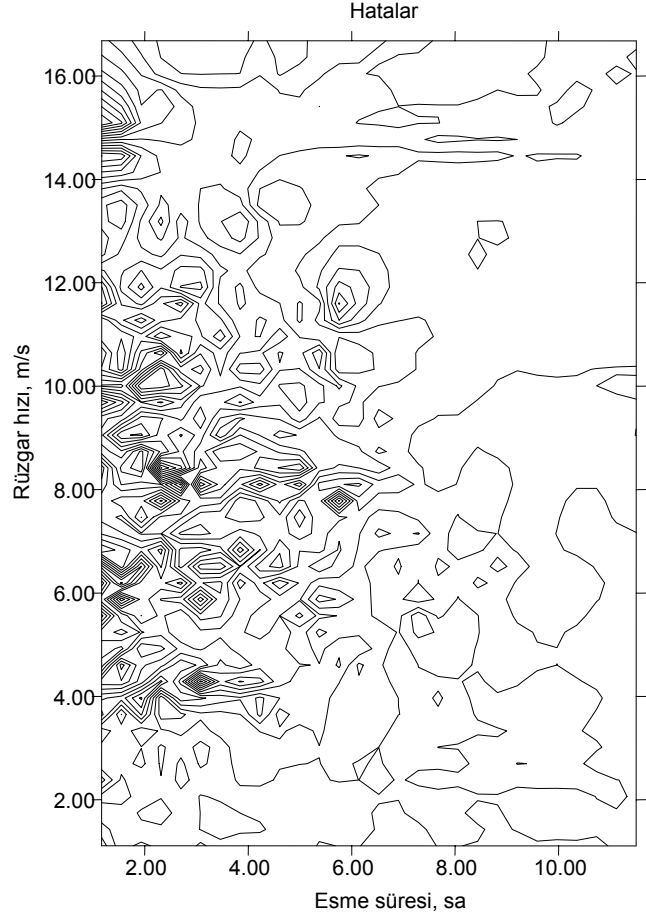


Şekil 9. Süre sınırlı durum için YÜDY ile dalga yüksekliği tahmin sonuçları

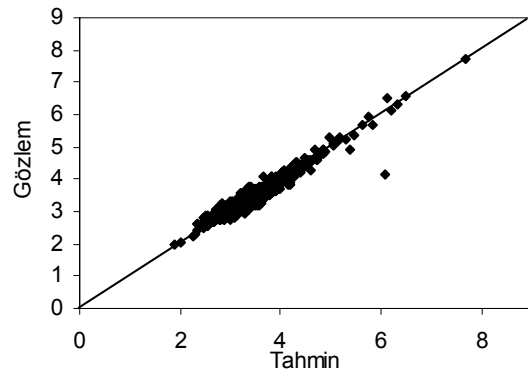
Dalga gücü haritaları

Dalga gücüne etki eden parametreler belirgin dalga yüksekliği ve periyoduna bağlı olarak üçlü diyagram yöntemi ile belirlenmiştir. Dalga gücü değişimi, feç ve süre sınırlı durumlar için kullanılan değişkenlere göre ayrı ayrı ele alınıp dalga gücü haritaları elde edilmiştir. Bu haritalar

ile bir takım faydalı yorumlar elde edilebilir. Bunun için haritalarda çeşitli yerlerden kesitler alınarak yorumlar yapılmıştır. Bir değişken sabit kalırken diğer değişkene göre dalga gücünde nasıl bir değişim meydana geldiği iki boyutlu kartezyen koordinat sisteminde gösterilmiştir.



Şekil 10. YÜDY ile süre sınırlı durumda dalga periyodu tahmini için hata haritası



Şekil 11. Süre sınırlı durum YÜDY ile dalga periyodu tahmin sonuçları

Yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği gibi feç sınırlı durumda etkin olan feç uzunluğu ve rüzgâr hızı gibi iki değişken vardır. Burada dalga gücünün değişimi feç uzunluğu ve rüzgâr hızı cinsinden elde edilmiştir. Değişkenlerden feç uzunluğu yatay eksen, rüzgâr hızı da düşey eksen, bulunurken dalga gücü bunlara dik eksen, gösterilmiştir. Genel anlamda dalga gücünün diğer iki değişkene bağlı olarak değişimi bu şekilde görülmektedir. Rüzgâr hızının etkili bir parametre olduğu, feç uzunluğunun ise çok büyük bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Süre sınırlı durum için olaya etki eden parametreler esme süresi ve rüzgâr hızıdır. Dalga gücü haritası esme süresi ve rüzgâr hızı değişkenleri esas alınarak çizilebilir. Değişkenlerden esme süresi yatay eksen, rüzgâr hızı düşey eksen, bulunurken üçüncü boyut olarak dalga gücü bunlara dik eksen, gösterilir. Genel anlamda dalga gücünün diğer iki değişkene bağlı olarak değişimi oldukça düzensiz bir dağılım göstermektedir. Özellikle esme süresinin küçük olduğu bölgelerde düzensizliğin arttığı, tepe ve çukurların etkisinin çoğaldığı görülmektedir. Rüzgâr hızının etkili bir parametre olduğu durumlarda, esme süresinin de büyük değerlerinin göz önüne alınması gerektiği göze çarpmaktadır. Ayrıca burada da yine feç sınırlı durumda olduğu gibi yaklaşık 8 ila 8.5 m/s'lik rüzgar hızlarında sonuçlar anlamlı çıkmamaktadır.

Sonuçlar

Bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon yapısını ifade etmek ve tahmin belirsizliklerini modellemek için jeoistatistiksel yaklaşım kullanılmıştır. Bu yöntem değişkenlerin gözlem değerleri arasındaki benzerlik (komşuluk) kavramından yola çıkar. En büyük özelliği durağan olmayan verilere de uygulanabilmesidir. Girdi ve çıktı değişkenleri arasında doğrusal olmayan bir bağ kurabilir. Bu çalışmada belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu gibi dalga parametrelerini feç sınırlı ve süre sınırlı durumlarda tahmin edebilmek için bir yöntem uygulanmıştır. Daha sonra değeri aranan nokta için Kriging ilkelerinden faydalanılarak en iyi (optimum) enterpolasyon yapılmıştır. Tahmin yapabilmek için eş dalga yüksekliği ve dalga periyodu haritaları hazır-

lanmıştır. Feç sınırlı durum için yatay ve düşey eksenler sırasıyla feç uzunluğu ve rüzgâr hızı iken bunlara dik eksen,deki değişken olarak dalga parametreleri alınmıştır. Aynı şekilde süre sınırlı durum için yatay eksen rüzgâr esme süresini düşey eksen ise rüzgâr hızını gösterirken bunlara dik eksen, yine dalga parametreleri bulunmaktadır. Feç sınırlı durum için küresel YV'lar kullanılarak geliştirilen haritalar gözlem değerlerine yakın sonuçlar vermiştir. Süre sınırlı durum içinde JONSWAP modeline göre daha iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ayrıca her iki durum için elde edilen YV'lar sayesinde veri yapıları hakkında bazı önemli çıkarımlar yapılmıştır. Üçlü diyagram yönteminin her iki durum içinde JONSWAP modeline göre daha iyi sonuçlar vermesine ek olarak çizilen haritalar yardımıyla bazı anlamlı mantıksal çıkarımlar da yapmak mümkün olabilmektedir.

Ayrıca üçlü diyagram yönteminde bulunan sonuçları daha da geliştirmek için yinelenmeli (adaptif) üçlü diyagram yöntemi sunulmuştur. Bu yöntem ile elde edilen sonuçların daha da iyileştirildiği görülmüştür. İlk aşama sonucunda elde edilen hatalara göre tekrar bir harita hazırlanarak hatalar tahmin edilmiş ve üçlü diyagram yöntemine göre bulunan tahminler üzerine eklenmiştir. Bu işlem en iyi model doğruluğu elde edilene kadar sürdürülebilmesine rağmen burada bir kez tekrarlandıktan sonra istenen sonuçlar elde edilmiştir. Süre sınırlı durum için tahmin sonuçlarında meydana gelen değişimler tam model çizgisi etrafındaki saçılmalar ve hata histogramları sayesinde açıkça gösterilmiştir. Daha sonra tahmin edilen dalga parametreleri kullanılarak dalga gücü haritaları hazırlanmış ve böylelikle rüzgâr parametrelerinden dalga gücü tahmin edilebilmiştir. Rüzgâr hızının feç uzunluğu ve esme sürelerine bakılarak dalga gücünde daha etkili olduğu görülmüştür. Feç uzunluğu ve esme süresinin çok düşük olduğu durumlarda rüzgâr hızının etkisi hemen hemen hiç kalmamaktadır.

Kaynaklar

- Agrawal, J.D., Deo, M.C., (2002). On-line wave prediction. *Marine Structures*, **15**, 57-74.
Araghinejad, S., Burn, D.H., ve Karamouz, M., (2006). Long-lead probabilistic of streamflow us-

- ing ocean atmospheric and hydrological predictors, *Water Resources Research*, **42**, W03431, doi:10.1029/2004WR003853.
- ASCE Task Committee on Geostatistical Techniques in Geohydrology of the Ground Water Hydrology Committee of the ASCE Hydraulics Division, (1990a). Review of geostatistics in geohydrology: I. Basic concepts. *Journal of Hydraulic Engineering*, **116**, 5, 612–632.
- ASCE Task Committee on Geostatistical Techniques in Geohydrology of the Ground Water Hydrology Committee of the ASCE Hydraulics Division, (1990b). Review of geostatistics in geohydrology: II. Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, **116**, 5, 633–658.
- Bishop, C.T., (1983). Comparison of manual wave prediction models, *Journal Waterway Port Coast and Ocean Engineering*, **109**, 1, 1-17.
- Bretschneider, C.L., (1970). Wave forecasting relations for wave generation, *Look Lab., Hawaii*, **1**, 31-34.
- Bretschneider, C.L., (1973). Prediction of waves and currents, *Look Lab., Hawaii*, **3**, 1-17.
- Carter, D.J.C., (1982). Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results, *Ocean Engineering*, **9**, 1, 17-33.
- Clark, I., (1979). *Practical Geostatistics*, Applied Science Publishers, London, U.K.
- Cressie, N., (1985). Fitting variogram models by weighted least squares, *Mathematical Geology*, **17**, 653-702.
- Cressie, N., (1993). *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, New York.
- Darbyshire, J., (1963). Forecasting wind generated sea waves, *Engineering*, **195**, 482-484.
- Deo, M.C., ve Kiran Kumar, N., (2000). Interpolation of wave heights, *Ocean Engineering*, **27**, 9, 907–919.
- Deo, M.C., Jagdale, S.S., (2003). Prediction of breaking waves with neural networks. *Ocean Engineering*, **30**, 9, 1163–1178.
- Deo, M.C., Jha, A., Chaphekar, A.S., Ravikant, K., (2001). Neural networks for wave forecasting. *Ocean Engineering*, **28**, 7, 889–898.
- Donelan, M.A. (1980). Smilarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods and directions, *Proceedings of Canadian Coastal Conference*, National Reasearch Council of Canada, 47-61.
- Donelan, M.A., Hamilton, J., Hui, W.H., (1985). Directional spectra of wind-generated waves, *Philosophy Transactions Royal Society. London*, **A315**, 509–562.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Deut. Hydrogr. Z.*, A8(12).
- Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M., (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford Univ. Press, Oxford.
- Journel, A., and Huijbregts, A., (1978). *Mining Geostatistics*, Academic Press, London, UK.
- Kazeminezhad, M.H., Etemad-Shahidi, A., ve Mousavi, S.J., (2005). Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters, *Ocean Engineering*, **32**, 14-15, 1709-1725.
- Kriege, D., (1951). A statistical problem to some basic mining valuation problems on the Witwatersand, *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of the South Africa*, **7**, 119-139.
- Makarynskyy, O., (2004). Improving wave predictions with artificial neural networks, *Ocean Engineering*, **31**, 5-6, 709–724.
- Makarynskyy, O., Pires-Silva, A.A., Makarynska, D., and Ventura-Soares, C., (2005). Artificial neural networks in wave predictions at the west coast of Portugal, *Computers Geosciences*, **31**, 415-424.
- Mandal, S., Rao, S., ve Raju, D.H., (2005). Ocean wave parameters estimation using backpropagation neural networks, *Marine Structures*, **18**, 3, 301-318.
- Matheron, G., (1963). Principles of geostatistics, *Economical Geology*, **58**, 1246–1266.
- Myers, D.E., Begovich, C.L., Butz, T.R. ve Kane, V.E., (1982). Variogram models for regional groundwater chemical data, *Mathematical Geology*, **14**, 629–644.
- Nash, J.E. ve Sutcliffe, J.E., (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part 1-A discussion of princibles, *Journal of Hydrology*, **10**, 3, 282-290.
- Pierson, W. J. ve Moskowitz, L., (1964). A proposed spectral form for fully-developed wind sea based on the similarity law of S. A. Kitaigorodskii, *Journal of Geophysical Research*, **69**, 5181-5202.
- Sırdaş, S. ve Şen, Z., (2003). Spatio-temporal drought analysis in the Trakya region, Turkey, *Hydrological Science Journal*, **48**, 5, 809-820.
- Subyani, A. M., (1997). Geostatistical analysis of precipitation in southwest Saudi Arabia, *PhD Thesis*, Colorado State University.

- Subyani, A. M. ve Şen, Z., (1989). Geostatistical modeling of the Wasia aquifer in central Saudi Arabia, *Journal of Hydrology*, **110**, 295-314.
- Şen, Z., Altunkaynak, A. ve Özger, M., (2004). El Nino-Southern Oscillation (ENSO) templates and streamflow prediction, *Journal of Hydrologic Engineering*, **9**, 5, 368-374.
- Tsai, C.P., Lin, C., Shen, J.-N., (2002). Neural networks for wave forecasting among multi-stations, *Ocean Engineering*, **29**, 13, 1683–1695.